

**В. В. ДМИТРИК, А. В. ГЛУШКО, М. И. ТУРЕНКО, А. Г. КАНТЕР, В. Ю. СКУЛЬСКИЙ**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СВАРОЧНОГО НАГРЕВА ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ресурс эксплуатации сварных соединений энергетического оборудования в значительной мере зависит от их структурного состояния. Целесообразно, для получения исходной структуры сварных соединений с улучшенными качественными характеристиками, производить моделирование сварочного нагрева при их изготовлении. Затем, на основе данных моделирования путем подбора параметров режима выполнять сам процесс сварки, позволяющий получать качественную исходную структуру сварных соединений с возможно меньшей структурной неоднородностью.

**Ключевые слова:** сварные соединения, сварочный нагрев, моделирование, структурная неоднородность, фаза.

**В. В. ДМИТРИК, А. В. ГЛУШКО, М. І. ТУРЕНКО, О. Г. КАНТЕР, В. Ю. СКУЛЬСЬКИЙ**

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОГО НАГРІВУ ВИГОТОВЛЯЄМИХ З'ЄДНАНЬ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Ресурс експлуатації зварних з'єднань енергетичного обладнання в значній мірі залежить від їх структурного стану. Доцільно, для отримання вихідної структури зварних з'єднань з поліпшеними якісними характеристиками, робити моделювання зварювального нагріву при їх виготовленні. Потім, на основі даних моделювання шляхом підбору параметрів режиму виконувати сам процес зварювання, що дозволяє отримувати якісну вихідну структуру зварних з'єднань з можливо меншою структурною неоднорідністю.

**Ключові слова:** зварні з'єднання, зварювальний нагрів, моделювання, структурна неоднорідність, фаза.

**V. V. DMYTRYK, A. V. GLUSHKO, M. I. TYRENKO, A. G. KANTER, V. Yu. SKULSKIY**

## MODELING OF WELDED HEATING OF MANUFACTURED COMPOUNDS OF ENERGY EQUIPMENT

The service life of welded joints of power equipment largely depends on their structural condition. It is advisable, to obtain the original structure of welded joints with improved quality characteristics, to simulate the welding heat during their manufacture. Then, on the basis of modeling data by selecting the mode parameters, perform the welding process itself, which allows to obtain a high-quality initial structure of welded joints with the least possible structural heterogeneity. It should be noted that welded joints with the obtained improved quality characteristics have a crucial function during the operation of the whole complex of power equipment. It is found that modeling the welding process is an important part in the manufacture of welded joints of power equipment. Simulation of welding heating allows to obtain the structure of welded joints with improved quality characteristics. When determining the required design temperature in welded joints, it is possible to determine the conditions for the formation of their optimal initial structure with improved quality characteristics. The development of this model for modeling the welding temperature heating of the compounds being made is applied in the manufacture of especially important and important structures of power equipment, which is very necessary and relevant.

**Keywords:** welded joints, welding heating, modeling, structural inhomogeneity, phase.

**Введение.** Важной проблемой, стоящей перед энергетикой Украины, является модернизация оборудования энергоблоков АЭС и ГЭС, выработавшего свой парковый ресурс. В первую очередь подлежат замене паропроводы и сварные соединения паропроводных систем, лимитирующие ресурс эксплуатации самих паропроводов. Сварные соединения характеризуются наличием определенной структурной, химической и механической неоднородности, предотвратить которую в полной мере не представляется возможным.

Однако, уменьшить общий уровень неоднородности можно, что достигается путем использования процесса сварки на оптимизированных параметрах режима. Подбор параметров на основе моделирования сварного нагрева изготавливаемых соединений. Именно моделирование и последующий процесс механизированной сварки позволяет получать исходную структуру сварных соединений с улучшенными качественными характеристиками. Такая структура в большей мере является стабильной в условиях знакопеременных динамических напряжений (при остановке энергетического оборудования).

Длительность эксплуатации сварных соединений энергетического оборудования зависит от структурного состояния структуры. Разработке данной проблемы уделяется пристальное внимание [1–3], т. к. ресурс эксплуатации сварных соединений находится в прямой зависимости от получения их исходной структуры.

**Результаты исследования.** Рассмотрим объем расплава ванны, рис. 1, с учетом данных работ [1–3], представленный в цилиндрической системе координат. Предположим, что имеет место квазистационарный процесс теплообмена и кристаллизации:

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \\ \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} + u \frac{\partial v}{\partial z} \right) = F_r - \frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left( \nabla^2 v - \frac{v}{r^2} \right) \\ \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial u}{\partial z} \right) = F_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \nabla^2 u \\ \rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial r} + u \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_k + \frac{j^2}{\sigma} \end{cases} \quad (1)$$

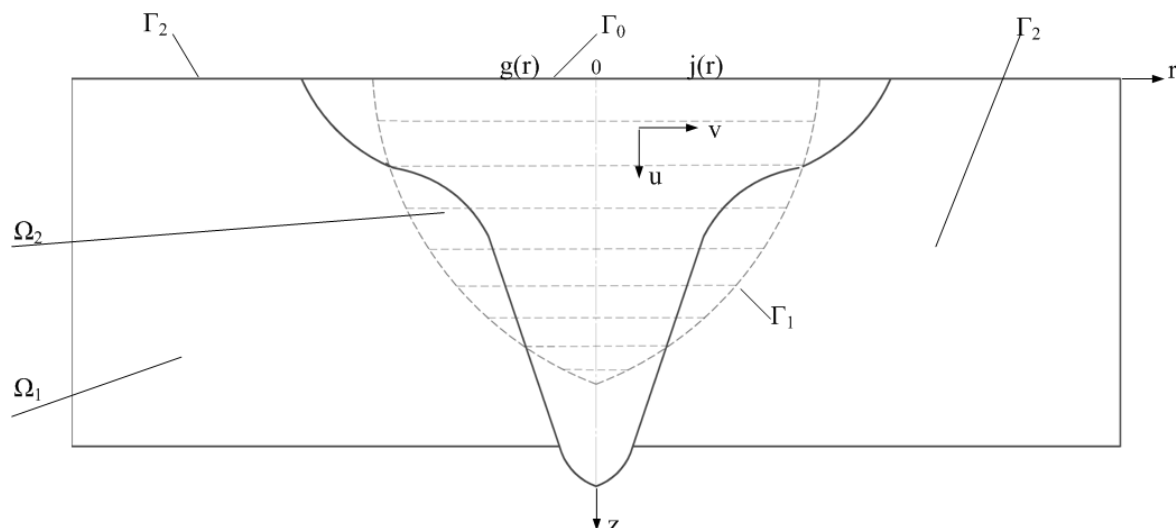


Рис. 1 – Схема аппроксимации границы фазового перехода двухпараметрическими параболоидами вращения:  
 $\Omega_1$  – область основного металла;  $\Omega_2$  – область расплава ванны

Струйный мелкокапельный перенос электродного металла обеспечивает дополнительный нагрев расплава ванны:

$$Q_k = H_d - H_v \quad (2)$$

В системе (1) удобнее перейти к новым переменным. Введем функцию тока расплава металла  $\psi$  и вихрь  $\xi$ . Связь с физическими переменными будет следующая:

$$\xi = \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r}; u = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}; v = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (3)$$

После выполнения соответствующих преобразований получим систему:

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \\ \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} + u \frac{\partial v}{\partial z} \right) = F_r - \frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left( \square v - \frac{v}{r^2} \right) \\ \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial u}{\partial z} \right) = F_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \square u \\ \rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial r} + u \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_k + \frac{j^2}{\sigma} \end{cases} \quad (4)$$

Свободную поверхность  $\Gamma_0$  области расплава ванны  $\Omega_1$ , рис. 1, будем считать плоской. Значение  $\Gamma_0$  запишем в виде:

$$\omega_0 = 0; \quad (5)$$

где  $\omega_0$  – интенсивность вихря

Заметим, что:

$$\omega_0 > 0; \quad \text{в } \Omega_1 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \omega_0}{\partial \vec{v}} = 1 \quad \Gamma_0 = \partial \Omega_1$$

Здесь  $\frac{\partial}{\partial \vec{v}}$  – дифференцирование по направлению внутренней нормали, определяемой единичным вектором нормали  $\vec{v}$  к границе  $\partial \Omega_1$ .

На свободной поверхности задан тепловой поток  $q$ :

$$q = k \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{3Q}{\pi \sigma_q^2} e^{\left( -\frac{3r^2}{\sigma_q^2} \right)} \quad (7)$$

$$r \leq \sigma_q^2$$

Зададим потенциал тока на поверхности  $\Gamma_0$

$$\psi = \text{const} = 0 \quad (8)$$

А так как вертикальная составляющая вектора скорости  $u = 0$ , то дополнительно имеем:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial \psi}{\partial r} = 0 \quad \text{на } \Gamma_0, \quad (9)$$

что означает отсутствие движения расплава со свободной поверхности в отрицательном направлении оси Oz. В плоскости  $z = 0$  составляющая  $v \neq 0$  (наличие вихря).

Условие на  $\Gamma_0$  для вихря  $\xi$  учитывает влияние сил поверхностного натяжения

$$\mu \xi = \frac{\partial T}{\partial r} \left( -\frac{\partial \gamma}{\partial T} \right) \quad \text{на } \Gamma_0, \quad (10)$$

где  $\frac{\partial \gamma}{\partial T}$  – температурный коэффициент поверхностного натяжения.

Рассмотрим краевые условия на участке границы  $\partial \Omega_1 = \Gamma_1$  объема, это поверхность ликвидуса.

$$T = T_l$$

$$\left\langle \lambda \frac{\partial T}{\partial v} \right\rangle = \alpha V_n \quad (11)$$

Компоненты  $u$  и  $v$  вектора скорости  $\vec{V}$  равны нулю.

$$u = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} = 0, v = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0 \quad (12)$$



Получим следующую систему:

$$\begin{cases} 2\pi \int_{\Omega} \left[ \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial \xi}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \xi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\xi}{r} \right] \varphi_k r dr dz = \\ = 2\pi \int_{\Omega} \left[ v \left( \frac{\partial^2 \xi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \xi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} - \frac{\xi^2}{r} \right) + g \beta (T - T_{\infty}) + \pi (\vec{j} \times \vec{B}) \right] \varphi_k r dr dz \\ 2\pi \int_{\Omega} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \xi \right] \varphi_k r dr dz = 0 \\ 2\pi \int_{\Omega} \left[ \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial z} \right] \varphi_k r dr dz = \\ = \frac{2\pi}{\rho C_p} \int_{\Omega} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_k \right] \varphi_k r dr dz, (k = 1, \dots, n) \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} \int_{\Omega} \left[ \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial \xi}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \xi}{\partial r} + \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\xi}{r} \right] \varphi_k dr dz + \\ + v \int_{\Omega} \left[ \left( \frac{\partial \xi}{\partial r} \varphi_k + r \frac{\partial \varphi_k}{\partial r} + \xi \frac{\partial \varphi_k}{\partial r} + \frac{\partial \xi}{\partial z} \frac{\partial \varphi_k}{\partial r} r \right) \right] \varphi_k dr dz + \\ + g B \int_{\Omega} T \left( \varphi_k + r \frac{\partial \varphi_k}{\partial r} \right) \varphi_k dr dz = \int_{\Omega} \pi (\vec{j} \times \vec{B}) \varphi_k dr dz \\ \int_{\Omega} \left[ \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \varphi_k}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_k}{\partial r} \left( \varphi_k + r \frac{\partial \varphi_k}{\partial r} \right) + \xi \varphi_k r \right] \varphi_k dr dz = 0 \\ \int_{\Omega} \left[ \varphi_k \left( -\frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial \psi}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{k r}{\rho C_p} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \frac{\partial \varphi_k}{\partial r} + \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial \varphi_k}{\partial z} \right) \right] \varphi_k dr dz = \int_{\Omega} Q_k \varphi_k dr dz, (k = 1, \dots, n) \end{cases} \quad (27)$$

Интегралы по поверхности обращаются в нуль из-за равенства нулю координатных функций  $\varphi_k$  на поверхности  $d\Omega$ .

Проинтегрировав интегралы из системы (26) по частям и разделив равенства на  $2\pi$  получим:

Интегралы по области  $\Omega_1$  вычисляются по квадратурным формулам Гаусса.

Выпишем разложения для температуры, вихря и скорости потока в следующем виде:

$$\begin{cases} T = \frac{1}{\omega_0^2 + \omega_1} \left\{ \omega_0^2 (T_L + \omega_1 \Phi_0) + \omega_1 (\Phi_0 - \omega_0 D_1^0 \Phi_0 - \omega_0 \frac{q}{k}) \right\} = \\ = \frac{\omega_0^2 T_L - \omega_0 \omega_1 \frac{q}{k} + \omega_0^2 \omega_1 + \omega_1 \Phi_0 - \frac{\omega_0 \omega_1}{\omega_0^2 + \omega_1} D_1^0 \Phi_0}{\omega_0^2 + \omega_1} = \\ = f_0 + f_1 \Phi_1 + f_2 D_1^0 \Phi_0 \\ \psi = \omega_0 \omega_1^2 \Phi_1 = f_3 \Phi_1 \\ \xi = \frac{\omega_1}{\omega_0 + \omega_1} \left[ \frac{1}{\mu} \frac{\partial T}{\partial r} \left( -\frac{\partial \gamma}{\partial T} \right) + \omega_0 \Phi_2 \right] = \frac{\omega_1}{\omega_0 + \omega_1} \frac{1}{\mu} \left( -\frac{\partial \gamma}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\omega_1}{\omega_0 + \omega_1} \omega_0 \Phi_2 = \\ = f_4 \frac{\partial T}{\partial r} + f_5 \Phi_2 \end{cases} \quad (28)$$

Взяв производные функций температуры, вихря и скорости потока, решаем полученные нелинейные алгебраические системы относительно коэффициентов ( $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$ ), входящих в разложения функций  $T$ ,  $\psi$  и  $\xi$  используя для этого решения метод Гаусса. При этом для решения относительно коэффициентов разложения  $a_j$  температуры  $T$  решается одна система линейных алгебраических уравнений (полученная из уравнения теплопроводности), для вихря  $\xi$  – две (полученные из уравнения движения и неразрывности), для функции тока  $\psi$  потоков жидкого металла – три (полученные из уравнений теплопроводности, движения и неразрывности).

Таким образом, в качестве первого приближения для температуры примем функцию  $T = T'$ , где  $T'$  получена после решения соответствующей системы линейных алгебраических уравнений. В качестве  $\xi'$  возьмем:

$$\xi' = \frac{1}{2} (\xi'_1 + \xi'_2),$$

где  $\xi'_1$  – решение системы уравнений, полученной из уравнения непрерывности,  $\xi'_2$  – решение системы уравнений, полученной из уравнения движения. Теперь имея представления для  $T$  и  $\xi$ , находим

$$\psi' = \frac{1}{3}(\psi'_1 + \psi'_2 + \psi'_3).$$

где,  $\psi'_1$  – решение уравнения непрерывности,  $\psi'_2$  – решение уравнения движения,  $\psi'_3$  – решение уравнения теплопроводности. Затем снова ищем приближение для температуры  $T^2$ , и так до тех пор, пока не будут выполнены следующие условия:

$$\begin{aligned} \max_j |T^{(k+1)} - T^{(k)}| &< \varepsilon \\ \max_j |\psi^{(k+1)} - \psi^{(k)}| &< \varepsilon \\ \max_j |\xi^{(k+1)} - \xi^{(k)}| &< \varepsilon \end{aligned} \quad (29)$$

где  $T^{(k+1)}$ ,  $T^{(k)}$ ,  $\psi^{(k+1)}$ ,  $\psi^{(k)}$ ,  $\xi^{(k+1)}$ ,  $\xi^{(k)}$  – значение соответствующих функций в  $j$ -х точках сетки интегрирования,

$\varepsilon$  – заданная точность вычислений.

Далее, делая шаг по времени, находили из условий (12), (13) для поверхности новые координаты дуги, расплавы ванны и ЗТВ, а затем решали приведенную выше стационарную задачу на новом временном промежутке.

На основе расчетных данных определения температурного режима в сварных соединениях представляется возможным определять условия для формирования их оптимальной исходной структуры. Аппроксимация расчетных температурных полей по сечению сварных соединений показала их достаточную (погрешность  $\leq 10\%$ ) сходимость с экспериментальными данными, рис. 2, 3.

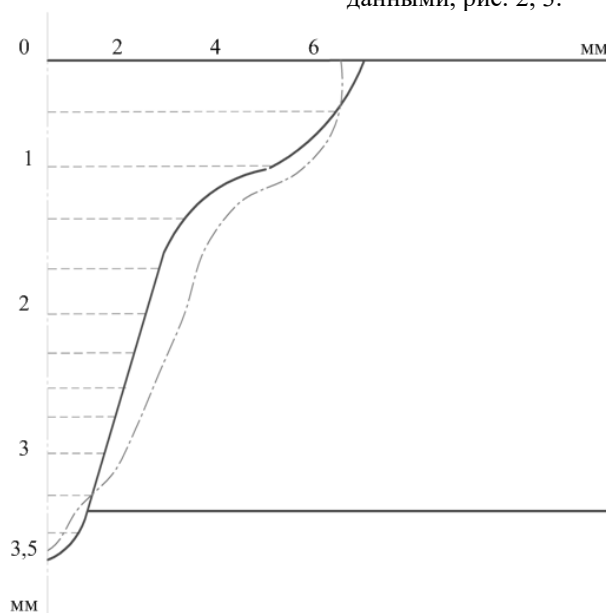


Рис. 2 – Схематическое представление изотерм, ограничивающих жидкую фазу (расплавы ванны) от твердой фазы (основной металл): – экспериментальные данные; --- расчетные данные

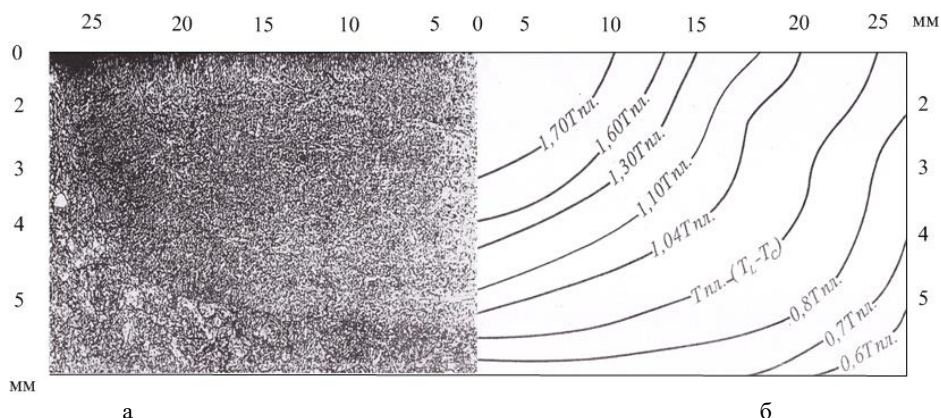


Рис. 3 – Фрагмент структур: а – изотермы; б – в металле шва (x100) и в ЗТВ сварного соединения из стали 15X1M1Ф

### Выводы:

1. Моделирование магнитогидродинамических процессов при дуговой сварке плавящимся электродом позволило с достаточной точностью определять температурный режим в сварных соединениях, что актуально для получения их исходной структуры с улучшенными качественными

характеристиками.

2. Реализация разработанной модели представляется целесообразной применительно к изготовлению особо ответственных сварных соединений конструкций АЭС.

## Список литературы

1. Sakuma Atsutsi, Inone Tatsuo. Nihon kikaigakkaironbushu // Trans. Jap. Soc. Mech. End. – 1996. Vol. 62, No 596 – P. 1032–1037
2. Masuyma Fujimitsu. Life assessment and extension of welded structures for high temperature components // Weld world. – 1993. Vol. 32, No 3. P. 51–64.
3. Дмитрик В.В. Метод определения температурного режима в расплаве сварочной ванны // Сварочное производство, 1998. №8. С. 19–21

## References (transliterated)

1. Sakuma Atsutsi, Inone Tatsuo. Nihon kikaigakkaironbushu // Trans. Jap. Soc. Mech. End. – 1996. Vol. 62, No 596 – P. 1032–1037
2. Masuyma Fujimitsu. Life assessment and extension of welded structures for high temperature components // Weld world. – 1993. Vol. 32, No 3. P. 51–64.
3. Dmitrik V.V. Metod opredeleniya temperaturnogo rezhima v rasplave svarochnoy vannyi // Svarochnoe proizvodstvo, 1998. No 8. P. 19–21.

Поступила (received) 25.11.2018

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Дмитрик Виталий Владимирович (Дмитрик Віталій Володимирович, Dmytryk Vitaliy)** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сварки, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина; svarka126@ukr.net

**Глушко Алена Валериевна (Глушко Альона Валеріївна, Glushko Alyona)** – старший преподаватель кафедры сварки, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина; <https://orcid.org/0000-0002-6245-9971>; alyonaglushko@gmail.com

**Туренко Мария Ивановна (Туренко Марія Іванівна, Turenko Maria)** – магистрант, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», кафедра сварки, Харьков, Украина, svarka126@ukr.net

**Кантер Александр Геннадиевич (Кантер Олександр Геннадійович, Kanter Alexandr)** – зав. лабораторией сварки, ПАТ Турбоатом, Харьков, Украина, svarka126@ukr.net

**Скульский Валентин Юрьевич (Скульський Валентин Юрійович, Skulskiy Valentin)** – ведущий научный сотрудник ИЭЗ ім. Є.О. Патона, Киев, Украина, svarka126@ukr.net